

カンボジアにおけるゴムプランテーションの 水・炭素収支に関する研究概要

小林菜花子^{*1}, 熊谷朝臣^{*1}, 宮沢良行^{*2}, ライアン マッド^{*3},
溝上展也^{*4}, トーマス ジアンベルッカ^{*3}

1. はじめに

東南アジアでは急激な土地改変が進んでいる。森林や農地が樹木プランテーションへ転換され、広大な面積にオイルパームやゴムノキ（正確にはパラゴムノキ）が整然と並ぶ姿を目にすることができる。世界の食料・農林水産業に関する統計データベースによれば、2010年時点で東南アジアにおけるオイルパームの耕作面積は約1000万ha、ゴムノキは約700万haである¹⁾。特にゴム栽培は、活発な品種改良により従来の栽培適地（北緯15度-南緯15度）から東南アジアの内陸山岳部へと拡大している。中国、ラオス、タイ、ベトナム、カンボジア、ミャンマーの一带では最近10年間で約100万haもの土地がゴムプランテーションに転換された¹⁾。

ゴムノキの乳液（ラテックス）の加工物である天然ゴムは工業用原材料であり、タイヤを初めとする多種多様な製品に使用される。合成ゴムでは代替が効かないため、一定の需要が見込まれる。ゴムプランテーションが今後も拡大するかどうかは、その需要の動向にかかっているだろう。近年のゴム生産の急激な増大と中国における需要の落ち込みにより、2014年春時点でのゴム相場は2011年に記録した過去最高値から60%以上も下落している。今後は、輸出各国が需要に応じて生産を調整し、相場を安定させることが求められる。ゴム栽培が伝統的な焼き畑農業の代替、かつ現金収入の手段として、多くの

小自作農とそこに雇用される人々の生活を支えていることは事実である²⁾が、これからは環境に配慮しつつ、効率的な生産を行うことが必要となろう。

天然林または二次林から植林地への大規模な転換の結果として懸念されるのは、生物多様性や炭素蓄積量の減少、土砂流出の増加、水資源の劣化である³⁾。最後に挙げた水資源について、開発著しい中国の雲南省ではすでに影響—乾季の河川流出量や霧の減少など—が報告されており、ゴムノキの水消費量が大きいことが原因と疑われている⁴⁾。しかし水利用とそれに密接に関連する炭素固定において、ゴムノキの生理生態や群落としての振る舞いについての知見は非常に限られており、これらの疑念に答えるには不十分である。本研究が目指すのは、野外観測に基づくデータを収集し、環境への配慮と効率的生産の双方を達成するための知見を得ることである。

2. 研究の概要

2.1 研究対象地域

研究対象とするゴムプランテーションは、カンボジア王国の中央南部に位置するコンボンチャム市からメコン川を挟んで東南東12.5kmにある（図1）。この地域ではアジアモンスーンの影響を受け、はっきりとした雨季（5-10月）と乾季（11-4月）がある。年平均気温は27.1℃、年間降水量は1694mmである⁵⁾。ゴムノキの適した生育条件は、年平均気温が28±2℃、年降水量が2000mm以上である⁶⁾から、

Kobayashi, Nakako, Tomo'omi Kumagai, Yoshiyuki Miyazawa, R.G. Mudd, Nobuya Mizoue, T.W. Giambelluca. Outline of Research on Water and Carbon Budget in Rubber Plantations in Cambodia

^{*1} 名古屋大学地球水循環研究センター, ^{*2} 九州大学東アジア環境研究機構, ^{*3} ハワイ大学地理学科, ^{*4} 九州大学農学研究院

若干の水不足による成長抑制（乾燥ストレス）が予想されるものの、概ね伝統的な植栽環境下にある。ゴムプランテーションの研究が行われている他の観測サイトは、乾燥や低温ストレスの大きい中国南部^{4,7)} やタイ東北部⁸⁾ に位置しており、本研究の結果はそれらのストレス環境下におけるゴムノキの振る舞いを理解する上で、重要な基礎情報となろう。

2.2 観測サイト

本研究は、主に名古屋大学・九州大学・ハワイ大学の研究者が協働し、データ取得や解析及び成果発表を行っている。われわれは2009年9月、カンボジアゴム研究所（CRRRI）が所有する実験林に観測サイトを設置し、研究を開始した。実験林の総面積は居住区も含め994 haである。古くからゴムノキの成長やラテックスの産出に関する実験的施行が行われ、中には樹齢60年以上の林分も残されている。また各林分は単一のクローンで構成されている。ゴムノキは南北に6m、東西に3mの間隔で整然と配置されており、植林時の立木密度は555本/haである。しかし成長の過程で1-2割が枯死し幼木を再植樹するため、ところどころに疎な場所が存在する。また列状に配置されたゴムノキの樹冠の隙間から日光が差し込み、林内は比較的明るい（写真1）。ゴムノキは樹齢4年以上になると、乾季に一時期だけ葉を落とし、また直ぐに展葉するようになる⁶⁾。研究対象地域では落葉は1月半ばから末にかけて生じ、2月末には夏季の状態に戻る。葉面積指数は最大4-5に達する。われわれは、クローンや林齢による違いを検討するために、0.216 haの観測プロットを二つ、隣り合う別種のクローン林分に設定した。一方の林分はスリランカで開発されたクローン（RRIC100）で2004年の植栽であり、もう一方の林分はマレーシアで開発されたクローン（PB330）で2001年の植栽である。2010年2月時点での平均胸高直径はそれぞれ13.3 cmと17.5 cmであり、平均樹高は11.4 mと19.4 mであった。樹齢の違いはわずか3年であるが、木のサイズは大きく異なっている。

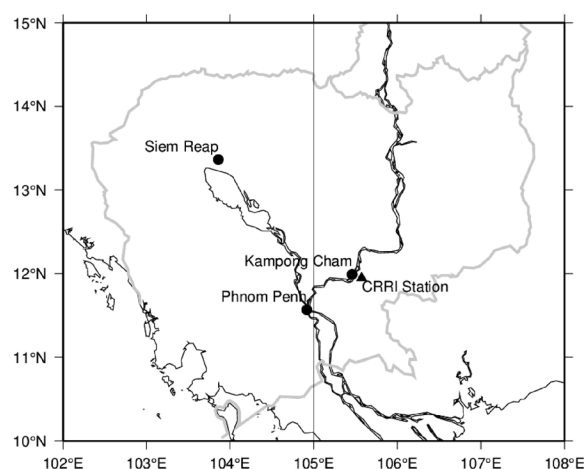


図1 研究対象地域
（●は主要都市，▲は観測サイト）



写真1 観測サイトの様子
（RRIC100プロット，2011年10月）

2.3 測定項目

RRIC100プロットに30mの気象観測用タワー（11°57'N, 105°34'E）を建設し、その頂上付近で渦相関法による顕熱・潜熱・二酸化炭素フラックスと一般微気象要素のモニタリングを行っている（写真2）。各プロット内では、それぞれ10本の木を選定して熱拡散法（通称グラニエ法）⁹⁾ による樹液流観測を行い、更に地表面付近の地温と深さ3.4mまでの土壌水分量を測定している。これらのデータは連続的に取得され、現在4年分の蓄積がある。また不連続ではあるが、葉面積指数、樹木成長量、ラテッ



写真 2 観測タワーの様子 (2012 年 3 月)

クス採取量, リター量, 個葉の生理特性及び土壌呼吸量などのデータも収集されている。

林床を含む群落全体の蒸発散量 (E) は潜熱フラックスから求められる。一方, 樹木蒸散量 (E_t) は辺材最外層 (樹皮下 0–20 mm) で測定した樹液流束密度の平均値に, 樹心部に向けての減速を考慮するための係数と辺材面積とを掛けて算出された¹⁰⁾。 E_t の欠測値は, あらかじめ群落コンダクタンス (g_c) の環境応答をモデル化しておき, 環境要素から推定して補間した。ここでコンダクタンスとは抵抗の逆数で, g_c は群落全体を一枚の葉とみなしたときの気孔における水蒸気の“通りやすさ”を意味する。

本稿では, これらの中から 2 年間 (2010–2011 年) の水収支について, 特に樹液流観測の結果を中心に, 得られた知見を紹介する。

3. これまでの研究成果

3.1 ゴムノキの成長速度

ゴムノキの最も特徴的な性質は, ラテックスの産出である。研究対象とした実験林では, 植栽から 7 年目にラテックスの採取 (タッピング) を開始する。これは一般的なゴム栽培のスケジュールと一致しており, この地域のゴムノキが平均的な生長速度を持つことが示唆される。しかしクローン間には大きな差異が見られ, タッピング開始時の胸高直径は

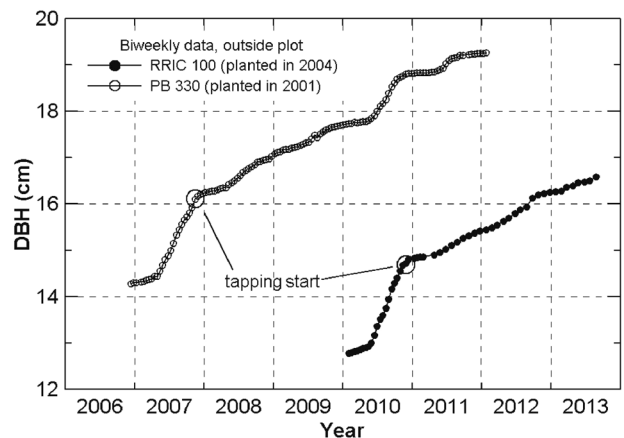


図 2 2 林分における平均胸高直径 (DBH) の時系列。RRIC100 プロットでは 2010 年秋, PB330 プロットでは 2007 年秋がタッピング開始のタイミングに当たる。

PB330 で RRIC100 よりも約 1.3 cm も大きかった (図 2)。またゴムノキの成長は本来非常に早い, タッピングによる炭素搾取によって幹の成長が鈍化する¹¹⁾。本サイトでも同様の傾向が観測され, 例えば RRIC10 プロットでは, 2010 年 (採取開始前) の幹成長量は年間 2.2 cm だったのに対し, 2011 年 (採取開始後) には 0.6 cm と約 1/4 に減少した。

3.2 樹木蒸散量の季節変化とその変動要因

図 3 に 2010–2011 年に観測された降水量と E_t の時系列を示す。 E_t は雨季に大きく乾季に減少, 落葉期に最も小さくなるが, 完全にゼロになることはなかった。 E_t の観測値から求めた g_c は, 大気飽差が大きく, 土壌水分が少ないほど小さな値を示した (図 4)。従ってゴムノキは, 大気及び土壌の乾燥に敏感に応答し, 気孔を制御して水損失を抑制しているといえる。また, 幹直径や葉面積といった樹木の生理学的パラメータが g_c の長期的な変動を規定する重要な要素であることも明らかになった¹⁰⁾。このことは, 3.1 章で述べたタッピングによる成長の鈍化が g_c に影響を及ぼす可能性を示唆している。

3.3 乾季の水利用

2010 年末の乾季は無降雨期間が長く, 展葉後の 2011 年 2 月には土壌が非常に乾燥した。しかしそれによって E 及び E_t が顕著に減少することはない

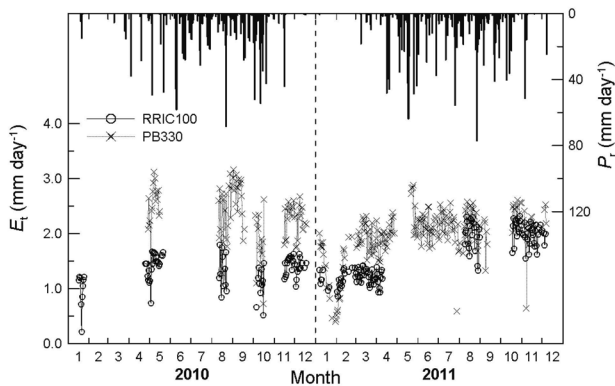


図3 RRIC100 及び PB330 プロットで観測された樹木蒸散量 (E_t) 及び降水量 (P_t) の日積算値。

かった (図3)。このとき表層から深さ1m以浅では土壌水分量の変化がほとんど見られなかったのに対し、1m以深では減少が見られた。このことから、ゴムノキが通常吸水を行っていると考えられる根の集中する表層部 (1m以浅) より深い場所から吸水を行っていることが示唆された。他の研究では、乾季にゴムノキの根が深部まで伸張することが観測されている¹²⁾。雨季に深部へ貯留された水を用いて、乾季の展葉や葉の成熟といった、その後の生育を左右する重要なプロセスを乗り切るゴムノキの戦略があると考えられる。

3.4 年間降水量と蒸発散・蒸散量の関係

表1に年間の降水量、 E 、及び E_t を示す。まず E_t については、どちらの年においても、林齢の高いRB330の方がRRIC100より大きかった。同じ環境条件下での g_c を比較しても前者が後者を上回っており、ここから示唆される前者の光合成能力の優位性は、同林齢でより大きな幹直径を記録していることとも整合している (3.1章)。また、RRIC100では2011年の E_t が2010年よりも200mm程度大きくなっているが、PB330ではむしろ小さくなっている。この違いは主に、2010年 (タッピング開始前) にRRIC100の幹成長量が非常に大きかったため、2011年における辺材面積が増大したこと起因している。

E_t は降水量の35-68%であったのに対し、 E は降水量にほぼ匹敵した (96-107%)。渦相関法によ

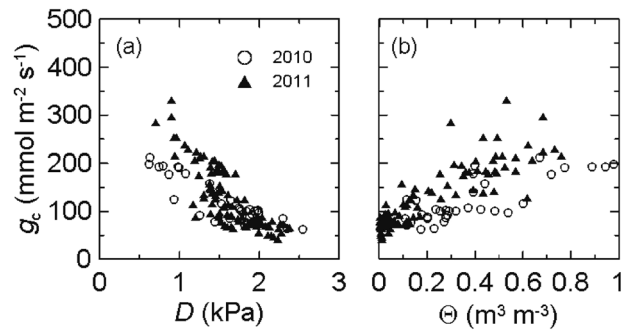


図4 RRIC100 プロットにおける (a) 群落コンダクタンス (g_c) と大気飽差 (D)、(b) g_c と土壌含水率 (Θ) の関係。土壌含水率は、有効水分量に対する利用可能水分量の比として定義 (0-50 cm 深の平均)。

る E がタワー周辺の面的な平均値であり、RRIC100及び隣接するPB330プロットの E_t を同程度に反映していると仮定すると、 E_t は E の49%を占める (2年間の平均値)。しかし一年のうちのほとんどが密な樹冠で覆われる林分において、この割合は予想されたよりかなり小さく、 E_t の過小評価の可能性を示唆している。同様のことが、生態系多層モデルに個葉レベルの生理特性データを代入して求めた E_t との相違からも示されている。ここで生態系多層モデルとは、群落を多層に区切って各層でのガス交換量を推定し、それを積み上げて全体量を求める手法である。

渦相関法による熱収支観測には、地表面への入力エネルギー (放射量から地中熱流量や貯留変化量を差し引いたもの) に対して大気へ放出されるエネルギー (顕熱と潜熱の和) が不足するインバランス問題が存在する¹³⁾。本観測サイトでは、 E は熱収支を満たし、かつボーエン比を維持するよう補正された。この補正を行わない場合でも、 E_t の E に占める割合は61%にとどまる。 E は広い面積 (タワーから風上数100mから数km) の平均値を表すのに対し、 E_t は狭い面積 (60m×36mのプロット内) の平均値を表すため単純には比較できないが、この寄与域の違いを考慮しても E_t の過小評価の可能性は高いだろう。

表 1 降水量 (P_r), 群落蒸発散量 (E), 樹木蒸散量 (E_t) の年積算値 (単位は全て mm yr^{-1})。

year	P_r	E	E_t	
			RRIC100	PB330
2010	1332	1430	469	904
2011	1545	1488	658	846

4. まとめ

ゴムプランテーションの群落蒸発散は乾季にも継続し、年間積算値は降水量に匹敵するほど大きかった。過去の研究と比較すると、その値は近隣の天然林より十分大きく、熱帯雨林と同程度である。この結果は中国南部の山岳地で行われた他の研究^{4,7)}を支持し、ゴム栽培において下流域での水資源の減少に配慮する必要があることを確認するものである。しかしこれがゴムノキの蒸散に起因することは、個葉レベルの観測によっては支持され、樹木レベルの観測によっては支持されなかった。

異なる手法間で整合性のある結果を得るために、樹木蒸散量の過小評価について幾つかの可能性を検討する必要がある。幹の温度勾配と樹液流速を関連づけるグラニエ経験式⁹⁾のゴムノキに対する適用可能性、夜間蒸散に起因する誤差、樹木個体内の樹液流速分布の不確実性などである。またクローン間で異なる蒸散量が観測されており、その差異が樹高や直径、葉面積などの樹木形態で説明できるかなども、今後の検討課題である。炭素収支については、観測された二酸化炭素フラックスと土壌・植生・大気結合モデルを用いて、高い生産性を達成するための最適な植栽間隔が明らかにされた¹⁴⁾が、炭素収支の全体像やラテックス採取という人為的関与の影響に関する分析はこれからである。また乾季の気象条件はゴムノキの若葉の健全性と密接な関係があり、それが年間の蒸散量やラテックス生産量に影響を及ぼしている可能性がある。この地域の気候変動が水・炭素収支に与える影響を予測することも課題の一つである。

謝辞

本研究は農林水産省「気候変動に対応した循環型食料生産等の確立のための技術開発」、文部科学省科学研究費助成事業 (23405028)、及び NASA (NNG04GH59G, NNX08AL90G) の助成を受けて行っている。また、カンボジアゴム研究所スタッフの現地協力に心より感謝する。

〔引用文献〕 1) FAO (2010) FAOSTAT. <http://www.faostat.fao.org/> (8 November 2012). 2) Mann (2009) Addicted to rubber. *Science* 325, 564–566. 3) Ziegler, A.D. *et al.* (2009) The rubber juggernaut. *Science* 324, 1024. 4) Tan, Z.H. *et al.* (2011) Rubber plantations act as water pumps in tropical China. *Geophys. Res. Lett.* 38, L24406. 5) SCW (2006) Atlas of Cambodia : national poverty and environment maps. Phnom Penh, Cambodia. 6) Priyadarshan P.M. (ed) (2011) Biology of Hevea rubber. CAB International, Wallingford, UK. 7) Guardiola-Claramonte, M. *et al.* (2010) Hydrologic effects of the expansion of rubber (*Hevea brasiliensis*) in a tropical catchment. *Ecohydrol* 3, 306–314. 8) Isarangkool Na Ayutthaya S. *et al.* (2011) Water loss regulation in mature *Hevea brasiliensis* : effects of intermittent drought in the rainy season and hydraulic regulation. *Tree Physiol.* 31, 751–762. 9) Granier, A. (1987) Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiol.* 3, 309–320. 10) Kobayashi, N. *et al.* (2014) Transpiration characteristics of a rubber plantation in central Cambodia. *Tree Physiol.* 34, 285–301. 11) Silpi, U. *et al.* (2006) Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiol.* 26, 1579–1587. 12) Gonkhamdee, S. *et al.* (2009) Growth dynamics of fine *Hevea brasiliensis* roots along a 4.5-m soil profile. *Khon Kaen Agric. J.* 37, 265–276. 13) Wilson, K. *et al.* (2002) Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* 113, 223–243. 14) Kumagai, T. *et al.* (2013) Simulation of canopy $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ fluxes for a rubber (*Hevea brasiliensis*) plantation in central Cambodia : The effect of the regular spacing of planted trees. *Ecol. Model.* 265, 124–135.